

(19) RÉPUBLIQUE FRANÇAISE  
INSTITUT NATIONAL  
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE  
PARIS

(11) N° de publication :  
(à n'utiliser que pour les  
commandes de reproduction)

**2 640 373**

(21) N° d'enregistrement national :

**88 16244**

(51) Int Cl<sup>8</sup> : G 01 B 7/14, 7/08; G 01 D 5/12.

(12) **DEMANDE DE BREVET D'INVENTION**

**A1**

(22) Date de dépôt : 9 décembre 1988.

(30) Priorité :

(71) Demandeur(s) : *OFFICE NATIONAL D'ETUDES ET DE RECHERCHES AEROSPATIALES, Etablissement Public de l'Etat — FR.*

(72) Inventeur(s) : Alain Bruère ; Claude Galaud.

(43) Date de la mise à disposition du public de la demande : BOPI « Brevets » n° 24 du 15 juin 1990.

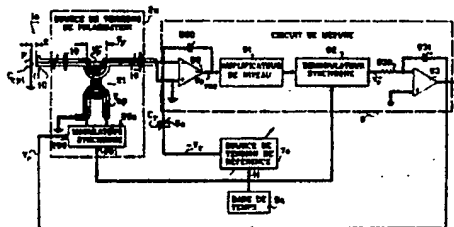
(60) Références à d'autres documents nationaux apparentés :

(73) Titulaire(s) :

(74) Mandataire(s) : Martinet et Lapoux.

(54) Chaînes de mesure dimensionnelle capacitive à sortie linéaire.

(57) Une chaîne de mesure dimensionnelle capacitive à sortie linéaire selon l'invention comprend essentiellement un capteur capacitif 1a formé d'une électrode de détection et d'une électrode de garde entourant l'électrode de détection alimentées respectivement par deux sources de tension de polarisation 2a, 2'a, un condensateur de référence 6a alimenté par une source de tension de référence 7a, et un circuit de mesure 9. Les sources de tension de polarisation sont à niveau variable et sont asservies en niveau par un signal de mesure de distance  $V_s$  délivré par le circuit de mesure. Le circuit de mesure comprend des moyens 90 à 93 pour recevoir, amplifier et démoduler un signal d'erreur appliqué en entrée et représentatif d'une différence entre une charge d'une capacité de capteur  $C_{cap}$  formée entre une électrode de capteur 10 et une pièce en regard P éloignée d'une distance  $a$  à mesurer et une charge du condensateur de référence. Le signal de mesure de distance fourni en sortie par le circuit de mesure représente linéairement la distance à mesurer  $a$ .



- 1 -

Chaînes de mesure dimensionnelle capacitive  
à sortie linéaire

La présente invention concerne de manière générale le domaine de la métrologie dimensionnelle sans contact. Plus particulièrement, l'invention concerne des chaînes de mesure dimensionnelle capacitive conçues pour produire directement un  
5 signal de mesure représentant linéairement une distance à mesurer.

Dans ce domaine de la technique, deux types de dispositifs de mesure sont principalement utilisés actuellement :

- des ponts de mesure d'impédance, et
- les chaînes de mesure capacitive.

10 Les ponts de mesure d'impédance de type manuel ou automatique, sont lourds d'emploi, limités en résolution et utilisables uniquement en régime statique. De plus, ils sont coûteux et non linéaires en mesure dimensionnelle.

Une chaîne de mesure capacitive telle que celles décrites par  
15 la demande de brevet FR-A-2608751 délivre généralement un signal de mesure représentatif d'une capacité. Le signal de mesure est inversement proportionnel à la distance à mesurer et ne représente donc pas linéairement cette distance. Un dispositif de linéarisation analogique ou numérique équipe généralement la chaîne  
20 afin de linéariser le signal de mesure. Le dispositif de linéarisation présente l'inconvénient d'introduire des erreurs supplémentaires et consécutivement de réduire les performances de la mesure dimensionnelle.

L'invention vise à fournir des chaînes de mesure  
25 dimensionnelle capacitive à sortie linéaire afin de pallier les inconvénients de la technique antérieure évoqués ci-dessus.

A cette fin, une chaîne de mesure dimensionnelle capacitive à  
sortie linéaire selon l'invention, comportant un capteur formé d'une électrode de détection et d'une électrode de garde entourant  
30 l'électrode de détection, une première et une deuxième source de tensions alternatives de polarisation délivrant des signaux de mêmes amplitudes, fréquences et phases et alimentant, respectivement, l'électrode de détection et l'électrode de garde,

- 2 -

des moyens pour recevoir, amplifier et démoduler un signal modulé en amplitude en fonction de la capacité du condensateur formé par l'électrode de détection et une pièce en regard, est caractérisée en ce qu'elle comprend un condensateur de référence alimenté par  
5 une troisième source de tension alternative délivrant un signal de référence de même fréquence et phase que le signal délivré par la première source, et des moyens recevant des premier et second courants traversant respectivement le condensateur formé par l'électrode de détection et la pièce en regard et le condensateur  
10 de référence, pour produire le signal modulé en amplitude en fonction, également, d'une différence entre les premier et second courants, et en ce que la première et la deuxième source sont commandées en niveau par un signal de mesure de distance appliqué en contre-réaction et produit par les moyens pour recevoir,  
15 amplifier et démoduler, ledit signal de mesure de distance étant linéairement représentatif d'une distance entre l'électrode de détection et la pièce en regard.

Comparativement à une chaîne de mesure dimensionnelle capacitive à sortie linéarisée selon la technique antérieure parmi  
20 les plus performantes, une chaîne de mesure selon l'invention associée à un capteur capacitif de caractéristiques analogues présente une étendue de mesure de l'ordre de quatre fois supérieure et réduit les erreurs de linéarité par un facteur sensiblement égal à 8.

25 D'autres avantages et caractéristiques de l'invention apparaîtront plus clairement à la lecture de la description suivante de plusieurs réalisations de l'invention en référence aux dessins annexés correspondants dans lesquels :

30 - la Fig. 1 est un bloc-diagramme d'une chaîne de mesure dimensionnelle capacitive à sortie linéarisée selon la technique antérieure ;

- la Fig. 2 est un bloc-diagramme de principe d'une chaîne de mesure dimensionnelle capacitive à sortie linéaire selon l'invention ; et

35 - la Fig. 3 est un bloc-diagramme détaillé d'une réalisation préférée d'une chaîne de mesure selon l'invention.

- 3 -

En référence à la Fig. 1, une chaîne de mesure dimensionnelle capacitive à sortie linéarisée selon la technique antérieure comprend un capteur capacitif 1 formé d'une électrode de détection 10 et d'une électrode de garde 11 entourant l'électrode de détection, une source de tension de polarisation 2, des liaisons triaxiales 13, un amplificateur de charge 3, un circuit d'amplification et de détection d'amplitude 4, et un dispositif de linéarisation 5.

La chaîne de mesure a pour fonction de produire un signal de mesure de distance  $V_e$  représentatif d'une distance  $e$  entre l'électrode centrale 10 du capteur 1 et une pièce P disposée en regard du capteur 1, parallèlement à l'électrode 10, et reliée à une borne de masse.

La source de tension de polarisation 2 est incluse en série entre le capteur 1 et l'amplificateur de charge 3 et délivre un premier signal sinusoïdal  $V_p$  pour polariser l'électrode de détection du capteur 1. La source 2 délivre, en outre, un deuxième signal sinusoïdal  $V'_p$ , dont l'amplitude et la phase sont les mêmes que celles du signal  $V_p$ , pour polariser l'électrode de garde du capteur et le conducteur de garde 131 des liaisons triaxiales 13. La source de tension 2 comprend un générateur sinusoïdal 20 et un transformateur 21 dont les enroulements primaire et secondaire sont réalisés en câbles coaxiaux. Le transformateur 21 est alimenté par le générateur sinusoïdal 20 et comprend un enroulement secondaire délivrant les signaux de polarisation  $V_p$ ,  $V'_p$  et relié au capteur 10 et à l'amplificateur de charge 3 à travers les liaisons triaxiales 13. Le conducteur central, ou âme du câble coaxial, est relié à l'une de ses extrémités à l'électrode de détection 10, et à l'autre extrémité, à l'entrée inverse (-) de l'amplificateur de charge 3. De même, le blindage du câble coaxial 13 est relié à l'électrode de garde et à l'autre entrée (+) de l'amplificateur de charge 3 et à la masse. On réalise ainsi une garde électrique totale des circuits assurant la polarisation du capteur, depuis l'amplificateur de charge jusqu'à l'électrode de détection. Le conducteur de masse 132 des liaisons triaxiales 13 est relié à une borne de masse et à l'électrode 12 du capteur 1. Un blindage électromagnétique 22 de la source de tension 2 est relié à la borne

- 4 -

de masse et aux conducteurs de masse 132 des liaisons triaxiales 13 de manière à rendre la liaison imperméable aux rayonnements électromagnétiques.

L'amplificateur 3 est du type amplificateur opérationnel. Une  
5 entrée directe + de l'amplificateur 3 est connectée à la borne de masse. Un condensateur 30 de capacité  $C_{cr}$  est placé en contre-réaction entre une sortie et l'entrée inverse - de l'amplificateur 3.

L'amplificateur 3 délivre en sortie un signal sinusoïdal de  
10 mesure  $V_{me}$  modulé en amplitude en fonction d'une capacité de capteur  $C_{cpt}$  essentiellement déterminée par la distance  $e$  entre l'électrode centrale 10 du capteur 1 et la pièce en regard P. Le signal  $V_{me}$  est exprimé par l'égalité suivante :

$$V_{me} = V_p \cdot C_{cpt} / C_{cr}$$

15 Le circuit d'amplification et de détection d'amplitude 4 produit à partir du signal  $V_{me}$  un signal de mesure de capacité  $V_{cap}$  dont l'amplitude est proportionnelle à la capacité de capteur  $C_{cpt}$ .

La distance  $e$  à mesurer est une fonction inverse de la capacité de capteur  $C_{cpt}$  de sorte que le signal  $V_{cap}$  délivré par le  
20 circuit 4 n'est pas linéairement représentatif de la distance  $e$ .

Le dispositif de linéarisation 5 est, par exemple, constitué d'un calculateur numérique équipé en amont d'un circuit d'échantillonnage et de numérisation. Le dispositif 5 est programmé pour le calcul d'une fonction inverse de type  $F(x)=1/x$ , où  $x$  est la  
25 variable. Le signal  $V_{cap}$  est appliqué en entrée du dispositif de linéarisation 5. Le dispositif 5 délivre en sortie le signal de mesure de distance  $V_e$  linéairement représentatif de la distance  $e$ .

En référence à la Fig. 2, il est décrit le principe de fonctionnement d'une chaîne de mesure dimensionnelle capacitive à  
30 sortie linéaire selon l'invention.

La chaîne de mesure comprend un capteur capacitif 1a, comportant une électrode de garde, représenté schématiquement par un condensateur de capacité  $C_{cpt}$ , deux sources de tension de polarisation 2a, 2'a, un condensateur de référence 6 de capacité  
35  $C_r$ , une source de tension de référence 7, un soustracteur de courants 8, et un circuit de mesure 9.

- 5 -

Les sources de tension alternative 2a, 2'a et 7 fonctionnent en synchronisme et délivrent respectivement : la tension de polarisation de l'électrode de détection  $V_p$ , la tension de polarisation de l'électrode de garde  $V'_p$ , et une tension de référence  $V_r$ . Les tensions  $V_p$ ,  $V'_p$  et  $V_r$  sont de mêmes fréquences, leur forme d'onde est sinusoïdale ou carrée et elles sont synchrones en phase. Les tensions  $V_p$  et  $V'_p$  ont la même amplitude.

Les sources de tension de polarisation 2a et 2'a sont du type à niveau commandé. L'amplitude des tensions  $V_p$  et  $V'_p$  dépend d'un signal de commande de niveau appliqué à une entrée 200 de la source 2a et à une entrée 200a de la source 2'a.

Selon l'invention, le signal de mesure de distance  $V_e$  disponible en sortie du circuit de mesure 9 est appliqué à l'entrée 200 de la source 2a et à l'entrée 200a de la source 2'a et asservit le niveau des tensions  $V_p$  et  $V'_p$  selon la relation :

$$V_p = V'_p = K_p \cdot V_e$$

où  $K_p$  est un coefficient de proportionnalité.

Selon une variante de réalisation, le signal de mesure de distance  $V_e$  commande les sources 2a et 2'a non pas directement, comme montré à la Fig. 2, mais à travers un circuit de filtrage et de correction de phase destiné à améliorer la stabilité de la chaîne de mesure.

Le capteur capacitif 1a et le condensateur de référence 6 de capacité  $C_r$  sont traversés par des courants  $I_{cpt}$  et  $I_r$  et ont des charges électriques  $Q_{cpt}$  et  $Q_r$ , respectivement. Les courants  $I_{cpt}$  et  $I_r$  alimentent respectivement des entrées inverse - et directe + du soustracteur de courants 8.

Le soustracteur 8 produit un courant d'erreur  $I_{er} = I_r - I_{cpt}$ . Le courant d'erreur  $I_{er}$  est fourni à une entrée du circuit de mesure 9.

Le circuit de mesure 9 comprend essentiellement un amplificateur opérationnel à contre-réaction capacitive et des moyens d'amplification de niveau, de démodulation synchrone et de filtrage (non représentés) afin de produire le signal de mesure de distance  $V_e$  représentatif de la distance  $e$  à mesurer.

Lorsque la chaîne de mesure fonctionne en régime statique ou en régime dynamique, dans son domaine de fréquence, le courant

- 6 -

d'erreur  $I_{er}$  fourni par le soustracteur 8 tend vers une amplitude nulle et les quantités de charges électriques  $Q_{cpt}$  et  $Q_r$  respectivement de la capacité de capteur 1 et du condensateur de référence 6 tendent vers la même valeur. Les charges  $Q_{cpt}$  et  $Q_r$  sont exprimées par les égalités  $Q_{cpt} = C_{cpt} \cdot V_p$  et  $Q_r = C_r \cdot V_r$  et il vient donc la relation :

$$V_p = V_r \cdot (C_r / C_{cpt}).$$

De cette relation est déduite l'expression suivante du signal de mesure de distance  $V_e$  :

$$V_e = (V_r / K_p) \cdot (C_r / C_{cpt}),$$

où  $V_r$  représente l'amplitude du signal de référence.

Cette expression montre que le signal  $V_e$  est inversement proportionnel à la capacité de capteur  $C_{cpt}$ . Le signal de mesure de distance  $V_e$  dans une chaîne de mesure selon l'invention est donc bien directement proportionnel à la distance  $e$ .

En référence à la Fig. 3, une réalisation préférée de la chaîne de mesure selon l'invention est maintenant décrite de manière détaillée.

La chaîne de mesure comprend un capteur capacitif 1a, une source de polarisation 2a, un câble coaxial 19, un condensateur de référence 6a associé à une source de tension de référence 7a, une base de temps 8a, et un circuit de mesure 9.

Le capteur capacitif 1a se différencie du capteur capacitif 1 montré à la Fig. 1 en ce qu'il ne comprend pas d'électrode de masse 12 et est de ce fait moins coûteux. Une électrode centrale 10 et une électrode de garde 11 sont reliées à des premières extrémités respectivement d'un conducteur central et d'un conducteur extérieur de blindage du câble coaxial 19.

La source de polarisation 2a comprend un modulateur synchrone 20a et un transformateur à câble coaxial 21.

Le modulateur synchrone 20a reçoit le signal de mesure de distance  $V_e$  à une entrée de commande de niveau 200 et un signal d'horloge H à une entrée d'horloge 201. Le signal d'horloge H est produit par la base de temps 8a. Le modulateur 20a délivre en sortie un signal alternatif  $V_a$  synchrone au signal d'horloge H. Le signal  $V_a$  alimente un enroulement primaire du transformateur 21.

- 7 -

Le transformateur à câble coaxial 21 est analogue au transformateur 21 montré à la Fig. 1. De préférence, un enroulement secondaire du transformateur 21 est constitué par une portion du câble coaxial 10 enroulé autour d'un noyau magnétique du transformateur 21. L'âme de l'enroulement secondaire du transformateur 21 délivre la tension de polarisation  $V_p$  de l'électrode de détection du capteur. Le blindage de l'enroulement secondaire délivre la tension de polarisation  $V'_p$  de l'électrode de garde. Cette disposition permet de réaliser les sources 2a et 2'a de la Fig. 2. Le condensateur 6a et la source de référence 7a sont de préférence de type réglable afin d'autoriser des ajustements de la valeur de la capacité  $C_r$  du condensateur 6a et de l'amplitude de la tension de référence  $-V_r$ , fournie par la source de référence 7a.

La source de référence 7a reçoit le signal d'horloge H fourni par la base de temps 8a et délivre en sortie la tension alternative de référence  $-V_r$ , qui est de même nature que les tensions de polarisation de l'électrode de détection  $V_p$  et de garde  $V'_p$ . La tension de référence  $-V_r$  est de même fréquence que les tensions de polarisation de l'électrode de détection  $V_p$ , et de garde  $V'_p$ , mais en opposition de phase par rapport à celles-ci afin de produire un courant d'erreur, par addition de deux courants de signes opposés, au niveau d'une entrée inverse - d'un amplificateur de charge 90 inclus dans le circuit de mesure 9.

Outre l'amplificateur de charge 90, le circuit de mesure 9 comprend un amplificateur de niveau 91, un démodulateur synchrone 92, et un intégrateur 93.

L'amplificateur de charge 90 est constitué d'un amplificateur opérationnel à contre-réaction capacitive. Une entrée inverse - de l'amplificateur 90 est reliée à l'âme d'une seconde extrémité du câble coaxial 19 et à travers le condensateur 6a à une sortie de la source de tension de référence 7a. Une entrée directe + de l'amplificateur 90 est reliée à la borne de masse de même que le conducteur de garde du câble 19. Un condensateur 900 est placé en contre-réaction entre une sortie et l'entrée inverse - de l'amplificateur 90. L'amplificateur 90 délivre en sortie un signal de mesure  $V_{me}$  de fréquence fondamentale égale à la fréquence du signal d'horloge H.



L'amplificateur de niveau 91 et le démodulateur synchrone 92 sont disposés en cascade entre l'amplificateur de charge 90 et l'intégrateur 93. L'amplificateur de niveau 91 a pour fonction d'amplifier le signal de mesure  $V_{me}$  à un niveau suffisamment élevé pour permettre son traitement par le démodulateur synchrone 92. Le démodulateur synchrone 92 est commandé par le signal d'horloge H afin de démoduler le signal de mesure  $V_{me}$  et produire en sortie un signal  $V_e^*$  à partir duquel est déduit, par intégration, le signal de mesure de distance  $V_e$ .

L'intégrateur 93 est constitué classiquement d'un amplificateur opérationnel et a pour fonction de produire le signal de mesure de distance  $V_e$  par intégration du signal  $V_e^*$ . Une fonction secondaire de l'intégrateur 93 est de garantir une stabilité du fonctionnement de la chaîne de mesure en introduisant un retard de phase de  $-\pi/2$  dans la boucle d'asservissement. L'intégrateur 93 reçoit le signal  $V_e^*$  à une entrée inverse -, à travers une résistance 930. Une entrée directe + de l'intégrateur 93 est reliée à la borne de masse. Un condensateur 931 est placé en contre-réaction entre une sortie et l'entrée inverse - de l'intégrateur 93. L'intégrateur 93 délivre en sortie le signal de mesure de distance  $V_e$ .

Les caractéristiques principales de la chaîne de mesure réalisée, associée à un capteur capacitif dont l'électrode de mesure a un diamètre de 1 mm et l'anneau de garde une largeur de 1,25 mm, sont données ci-après :

- gamme de mesure 0 à 2,5 mm ;
- linéarité  $< \pm 0,15 \mu m$  entre 0 et 1 mm ;  
 $< \pm 0,5 \mu m$  entre 1 et 2,5 mm ;
- dérive en température  $< 10^{-5}$  de l'étendue de mesure / °C ;
- résolution, dans une bande de fréquence de 0 à 1 Hz  $< 20 \text{ nm}$  correspondant à une capacité de  $2 \cdot 10^{-19} \text{ F}$ .
- bande passante du continu à 200 Hz.

A titre de comparaison, les ponts de mesure d'impédances connus reposant sur l'utilisation de courants de Foucault et associés à un capteur inductif ayant les mêmes dimensions que le capteur capacitif ci-dessus ont les caractéristiques suivantes (Kaman Sciences Corporation) :

2640373

- 9 -

- gamme de mesure 0 à 1,27 mm ;
- linéarité  $< \pm 12 \mu\text{m}$  ;
- résolution  $< 0,12 \mu\text{m}$ .

- 10 -

RE V E N D I C A T I O N S

1 - Chaîne de mesure dimensionnelle capacitive à sortie linéaire comportant un capteur capacitif (1, 1a) formé d'une électrode de détection (10) et d'une électrode de garde (11) entourant l'électrode de détection, une première et une deuxième

5 source de tensions alternatives de polarisation (2, 2a), (2'a) délivrant des signaux ( $V_p$ ,  $V'_p$ ) de mêmes amplitudes, fréquences et phases et alimentant, respectivement, l'électrode de détection (10) et l'électrode de garde (11), des moyens pour recevoir, amplifier et démoduler (3, 4, 9) un signal modulé en amplitude ( $V_{me}$ ,  $V_{a_{me}}$ ) en

10 fonction de la capacité ( $C_{cpt}$ ) du condensateur formé par l'électrode de détection (10) et une pièce en regard (P), caractérisée en ce qu'elle comprend un condensateur de référence (6, 6a) alimenté par une troisième source de tension alternative (7, 7a) délivrant un signal de référence ( $V_r$ ) de mêmes fréquence et

15 phase que le signal délivré par la première source (2, 2a), et des moyens recevant des premier et second courants ( $I_{cpt}$ ,  $I_r$ ) traversant, respectivement, le condensateur formé par l'électrode de détection et la pièce en regard et le condensateur de référence (6, 6a) pour produire le signal modulé en amplitude ( $V_{a_{me}}$ ) en

20 fonction, également, d'une différence entre les premier et second courants ( $I_{er} = I_r - I_{cpt}$ ), et en ce que la première et la deuxième sources (2, 2a, 2'a) sont commandées en niveau par un signal de mesure de distance ( $V_e$ ) appliqué en contre-réaction et produit par les moyens pour recevoir, amplifier et démoduler (9), ledit signal

25 de mesure de distance étant linéairement représentatif d'une distance (e) entre l'électrode de détection (10) et la pièce en regard (P).

2 - Chaîne de mesure conforme à la revendication 1, caractérisée en ce qu'elle comprend, en outre, une base de temps

30 (8a) pour produire un signal d'horloge (H) destiné à synchroniser le fonctionnement des première, seconde et troisième sources (2a, 2'a, 7a) et des moyens de démodulation (92) inclus dans les moyens pour recevoir, amplifier et démoduler (9), et des moyens (93) pour intégrer le signal de mesure de distance ( $V_e$ ).

- 11 -

3 - Chaîne de mesure conforme à la revendication 1 ou 2, caractérisée en ce que le condensateur de référence (6a) est du type ajustable.

5 4 - Chaîne de mesure conforme à l'une quelconque des revendications 1 à 3, caractérisée en ce que la troisième source est du type à niveau ajustable.

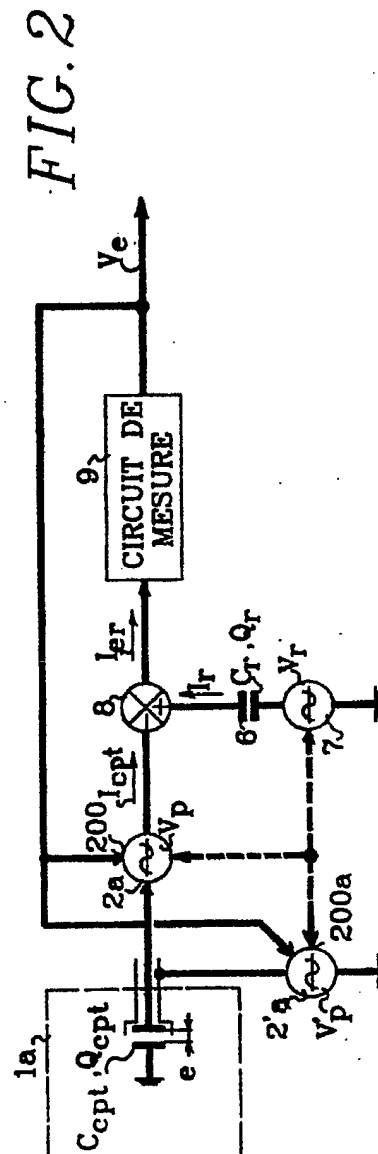
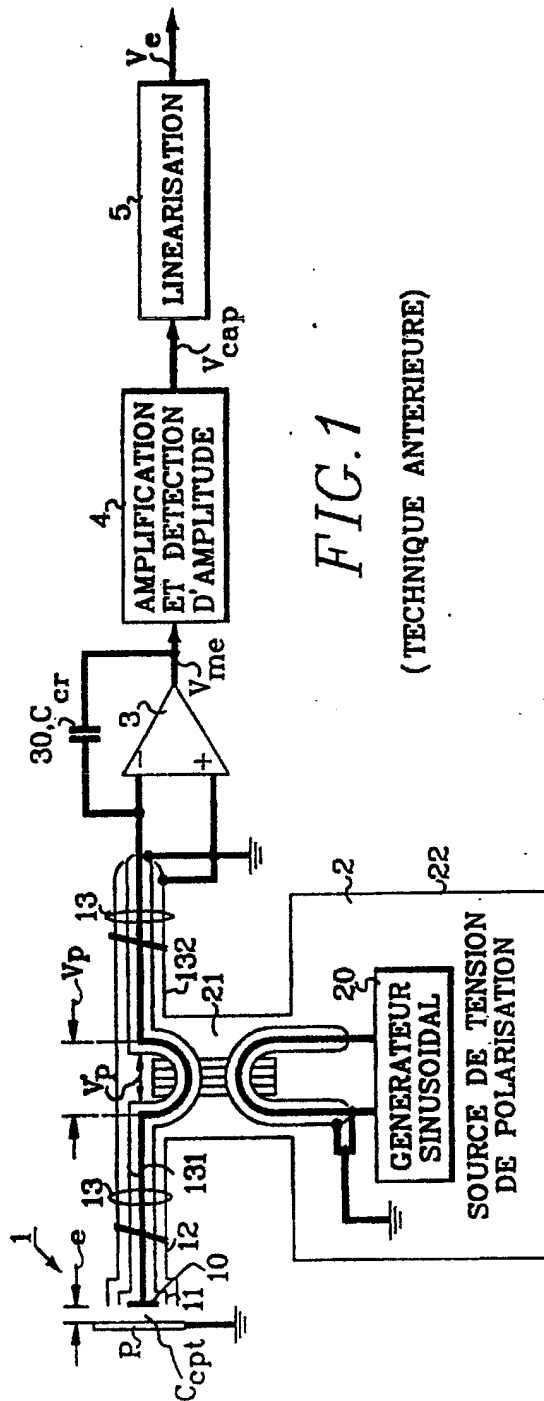
10 5 - Chaîne de mesure conforme à l'une quelconque des revendications 1 à 4, caractérisée en ce que la première et la deuxième sources de tensions alternatives de polarisation (2, 2a), (2'a) sont constituées de l'enroulement secondaire d'un transformateur (21) dont les enroulements primaire et secondaire sont réalisés en câbles coaxiaux, l'enroulement secondaire étant disposé en série entre le capteur (1, 1a) et un amplificateur de charge (3) à travers des liaisons (13), le conducteur central du  
15 câble coaxial étant relié à une de ses extrémités à l'électrode de détection (10) et à l'autre extrémité à une première entrée de l'amplificateur de charge (3), le blindage du câble coaxial étant relié à une de ses extrémités à l'électrode de garde (11) et à l'autre extrémité à la seconde entrée de l'amplificateur (3) et le  
20 conducteur central de l'enroulement primaire du transformateur 21 étant alimenté par le signal produit par les moyens pour recevoir, amplifier et démoduler (3, 4, 9), à travers un modulateur synchrone (200) synchronisé par la base de temps (8a).

25 6 - Chaîne de mesure selon la revendication 5, caractérisée en ce que les liaisons (13) sont des câbles coaxiaux (19).

7 - Chaîne de mesure selon la revendication 5, caractérisée en ce que les liaisons (13) sont des liaisons triaxiales.

30 8 - Chaîne de mesure selon la revendication 6, caractérisée en ce que la pièce (P), la seconde entrée de l'amplificateur de charge (3) et l'une des extrémités du blindage de l'enroulement primaire du transformateur (21) sont reliées à la masse.

1/2



2640373

2/2

FIG. 3

